



УДК 53.082.52

ИЗМЕРИТЕЛЬ ЭНЕРГИИ ИМПУЛЬСОВ ЭКСИМЕРНОГО ЛАЗЕРА НА ОСНОВЕ ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ЭФФЕКТА ПЛЕНОК ОКСИДА ИНДИЯ-ОЛОВА

И.К. Мешковский^а, С.А. Пляцков^а^а Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская ФедерацияАвтор для переписки: plyastsov@niuitmo.ru**Информация о статье**

Поступила в редакцию 10.01.17, принята к печати 17.02.17

doi: 10.17586/2226-1494-2017-17-2-256-262

Язык статьи – русский

Ссылка для цитирования: Мешковский И.К., Пляцков С.А. Измеритель энергии импульсов эксимерного лазера на основе фотоэлектрического эффекта пленок оксида индия-олова // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2017. Т. 17. № 2. С. 256–262. doi: 10.17586/2226-1494-2017-17-2-256-262**Аннотация**

Рассмотрены вопросы измерения энергии импульсов эксимерного лазера. Целью работы является создание и исследование работы измерителя энергии импульсов на основе фотоэлектрического эффекта пленок оксида индия-олова. Предложена конструкция и электрическая схема фотоэлектрического измерителя. Проведено сравнение результатов многократных измерений энергии импульсов эксимерного лазера для измерителя на основе фотоэлектрического эффекта и коммерческого детектора на основе пироэлектрического эффекта. Показано, что погрешность измерений с помощью предлагаемого прибора не превышает погрешность измерений для пироэлектрического детектора. Обнаружено, что измеритель на основе фотоэлектрического эффекта обладает рядом преимуществ: он не подвержен влиянию механического воздействия, не требует установки нулевого уровня, менее чувствителен к влиянию температуры пластины чувствительного элемента. В работе определены границы диапазона энергий, в котором может работать чувствительный элемент измерителя. Продемонстрировано, что при плотностях энергий выше 78 мДж/см² происходит разрушение поверхности под воздействием оптического излучения.

Ключевые слова

оксид индия-олова, фотоэлектрический эффект, измеритель энергии лазерного излучения, эксимерный лазер, тонкие пленки

EXCIMER LASER PULSE ENERGY METER BASED ON PHOTOELECTRIC RESPONSE OF INDIUM-TIN OXIDE FILMS

I.K. Meshkovskiy^а, S.A. Plyastsov^а^а ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian FederationCorresponding author: plyastsov@niuitmo.ru**Article info**

Received 10.01.17, accepted 17.02.17

doi: 10.17586/2226-1494-2017-17-2-256-262

Article in Russian

For citation: Meshkovskiy I.K., Plyastsov S.A. Excimer laser pulse energy meter based on photoelectric response of indium-tin oxide films. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2017, vol. 17, no. 2, pp. 256–262 (in Russian). doi: 10.17586/2226-1494-2017-17-2-256-262**Abstract**

The paper deals with the problems of excimer laser pulse energy measurements. The goal of the current work is to research and develop the construction and characteristics of laser energy meter based on the photoelectric films of indium-tin oxide. Photoelectric voltage linearly depends on the laser pulse energy. We propose the construction and electric scheme of the energy meter. Comparison of the measurement results of photoelectric energy meter and pyroelectric energy meter is carried out. It is shown that the measurement error of photoelectric energy meter does not exceed the one for pyroelectric energy meter. Also it is found that photoelectric energy meter has several advantages: mechanical shock has no influence on the energy meter results, energy meter requires no zero level calibration, sensor temperature dependence is less than for pyroelectric meter. We measure the work energy diapason for the meter sensor element. It is shown that the surface degradation occurs under the irradiation with energy density equal to 78 mJ/cm².

Keywords

indium-tin oxide, photoelectric effect, laser energy meter, excimer laser, thin films

Введение

Эксимерные лазеры широко применяются для проведения научных исследований. Основные применения эксимерных лазеров – запись брэгговских решеток в оптических волокнах [1], отжиг с помощью эксимерного лазера [2], обработка поверхности [3–5], микрообработка с помощью абляции, такая как сверление микроотверстий или мезопористых структур [6] и др. Во всех рассмотренных случаях важную роль играет измерение значения энергии импульса эксимерного лазера.

Отличительные особенности импульсов, генерируемых эксимерными лазерами – длины волн в ультрафиолетовом (УФ) диапазоне (320 нм, 248 нм, 190 нм), короткие длительности импульсов (5–40 нс) и высокие значения энергии (до единиц джоулей) [7, 8]. Устройствами, позволяющими измерить энергию лазерного импульса, являются детекторы на основе полупроводниковых диодов, детекторы на основе термоэлектрических эффектов и пироэлектрические детекторы [9]. На сегодняшний момент наиболее подходящим решением для измерения энергии является пироэлектрический детектор [10]. В основе работы таких детекторов лежит пироэлектрический эффект: поглощенное излучение нагревает пластину пироэлектрика, и на ее краях образуется разность потенциалов, пропорциональная значению энергии импульса [11].

Тем не менее, пироэлектрические детекторы имеют ряд недостатков. Пироэлектрический эффект обычно присутствует вместе с пьезоэлектрическим эффектом [12], поэтому показания пироэлектрических детекторов могут быть чувствительны к механическим воздействиям. Такой детектор требует предварительной калибровки нуля относительно внешних условий (температуры внешней среды и влажности). Выходной импульс пироэлектрического детектора имеет большую длительность, что ограничивает частоту следования лазерных импульсов, при которой детектор способен проводить измерения [13].

В работах [14, 15] был исследован фотоэлектрический отклик пленок оксида индия-олова (ITO) на воздействие УФ излучения. Было продемонстрировано, что величина фотоэлектрического отклика линейно зависит от энергии лазерного импульса. Возникновение фотовольтаического отклика связано с фотозлектрической эмиссией электронов с поверхности ITO. Эксперименты показали, что время отклика для пленок ITO существенно меньше, чем для пироэлектриков [15]. Данный эффект может быть использован для измерения энергии импульсов эксимерного лазера.

Целью работы было создание и исследование работы измерителя энергии импульсов эксимерного лазера на основе фотоэлектрического эффекта пленок ITO.

Методика экспериментов

В экспериментальных исследованиях были использованы коммерчески доступные пленки производства компании НПК «Политех». Тонкие пленки ITO были нанесены методом магнетронного распыления. В качестве мишени использовалась металлическая пластина из сплава In и Sn в соотношении 9:1. Вещество наносилось по нормали к поверхности. Температура подложки составляла около 300 °С. Окисление металла происходило непосредственно на подложке. Толщина покрытия была существенно неоднородна вдоль поверхности образца. Неоднородность толщины пленок определялась с помощью профилометра.

В качестве источника оптического излучения использовался KrF эксимерный лазер Coherent COMPex 102F. Длина волны лазера составляет 248 нм, длительность лазерного импульса – 22 нс. Энергия импульса лазерного излучения варьировалась от 10 до 150 мДж. Лазерный импульс падал на поверхность пленки ITO. Появляющаяся на электродах во время облучения разность потенциалов регистрировалась с помощью осциллографа. Методика измерения фотоэлектрического отклика подробно описана в [15]. Для измерения импульсов фотоэлектрического отклика был использован осциллограф Tektronix 3300. Сопротивление образцов измерялось между медными контактами с помощью мультиметра Rigol DM3000.

Для определения степени воздействия лазерного излучения на пленки ITO были проведены измерения топографии поверхности. Изображения поверхности пленок ITO были получены с помощью многофункциональной зондовой установки AIST, включающей в свой состав атомно-силовой микроскоп. Топография была измерена в полуконтактном режиме атомно-силового микроскопа. Диаметр конца измерительного зонда был не более 20 нм.

Измеритель энергии импульсов эксимерного лазера содержал следующие функциональные блоки: чувствительный элемент, пиковый детектор, аналого-цифровой преобразователь (АЦП), микроконтроллер с подключением к персональному компьютеру (ПК). Из исходной пластины было вырезано 20 образцов с размерами 10×30 мм². По краям образцов были нанесены медные контакты (рис. 1, а). Размер рабочей области чувствительного элемента (ЧЭ) был выбран исходя из следующего критерия: рабочая область по площади должна совпадать с формой сечения лазерного луча. В работе [15] показано, что величина максимального фотовольтаического отклика существенно зависит от величины неоднородности толщины.

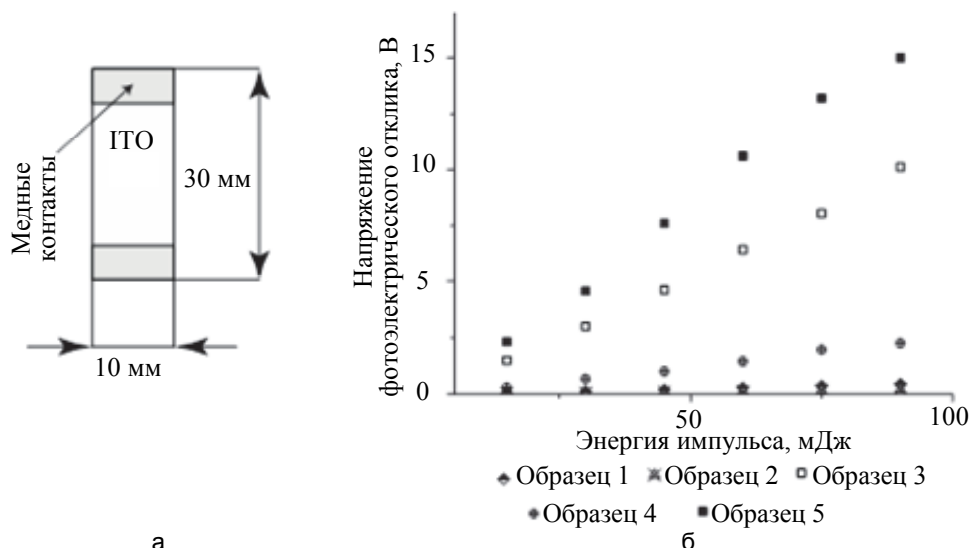


Рис. 1. Схематичное изображение образцов для чувствительного элемента исследуемого измерителя энергии импульсов эксимерного лазера (а); типичные энергетические зависимости максимального значения величины фотоэлектрического отклика для ряда образцов с различными значениями степени неоднородности толщины покрытия (б)

Произведены измерения зависимости максимального значения разности потенциалов фотоэлектрического отклика от энергии (рис. 1, б). Для всех образцов данная зависимость была линейной во всем диапазоне измеряемых энергий. В качестве ЧЭ был выбран образец с наибольшим значением тангенса угла наклона энергетической характеристики максимальной разности потенциалов.

Пиковый детектор был изготовлен по схеме, представленной на рис. 2, а. В качестве операционных усилителей были использованы усилители ADA6817 (Analog Devices) с полосой пропускания 500 МГц и низким током смещения (2 пА). Так как второй операционный усилитель (ОУ) имеет малый ток смещения, то спад напряжения на конденсаторе будет определяться обратным током через диод VD2. Благодаря резистору R2 напряжение на диоде VD2 после перехода ОУ в режим насыщения становится равным нулю. Данные меры помогают существенно снизить скорость разрядки конденсатора С. Величина емкости конденсатора составляла около 50 пФ. Передаточная характеристика пикового детектора была измерена с помощью осциллографа Tektronix 3300 и генератора Tektronix AFG300. Генератор подавал импульсы с длительностью 30 нс на вход пикового детектора, выходной сигнал с пикового детектора регистрировался осциллографом.

Исследовательские испытания измерителя энергии импульсов эксимерного лазера проводились с помощью установки, схема которой изображена на рис. 2, б. Излучение от эксимерного лазера падало на чувствительный элемент исследуемого измерителя. Далее электрический сигнал на краях ЧЭ регистрировался с помощью пикового детектора. Одновременно с процессом измерения форма электрического сигнала с ЧЭ регистрировалась с помощью осциллографа. Часть излучения (около 10%) [16] отражалась от поверхности пленок ITO и направлялась на пироэлектрический измеритель энергии Coherent UV-Max-248. Пиковый детектор с помощью АЦП и микроконтроллера был подключен к ПК. Процесс измерений управлялся с помощью ПК. Все значения регистрировались и сохранялись в файл.

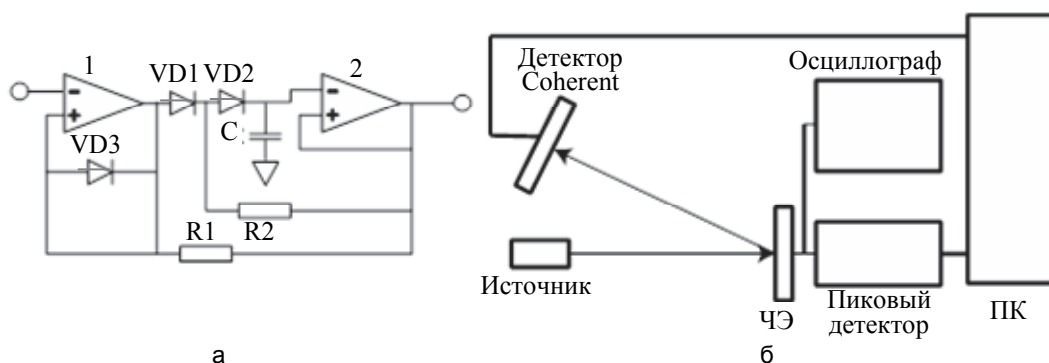


Рис. 2. Схема пикового детектора измерителя энергии импульсов эксимерного лазера (а); схема установки для проведения исследования работы указанного измерителя (б)

Результаты и обсуждение

На рис. 3, а, приведена передаточная характеристика пикового детектора, выполненного по схеме, изображенной на рис. 2, а. Передаточная характеристика имеет два ярко выраженных линейных участка, обусловленных, по-видимому, режимами работы операционных усилителей.

На рис. 3, б, приведены результаты измерений 10 000 импульсов лазерного излучения с энергией 30 мДж, сгенерированных с частотой 10 Гц. Видно, что с увеличением длительности работы пироэлектрического детектора наблюдается дрейф нулевого уровня, вызванный нагревом пластины чувствительного элемента. Для исследуемого измерителя величина дрейфа оказалась существенно меньше, чем для детектора на основе пироэлектриков.

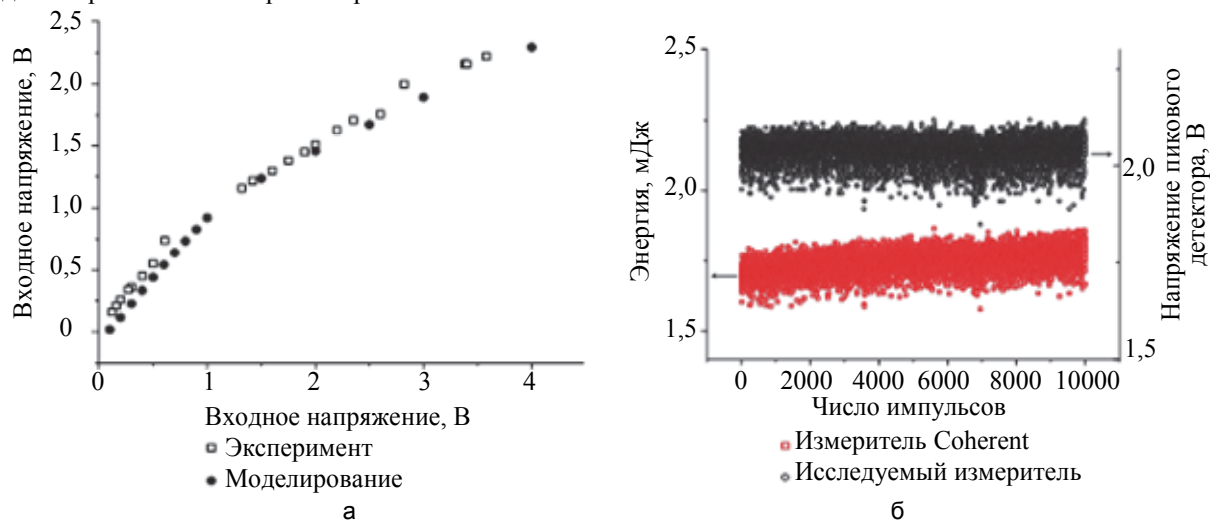


Рис. 3. Передаточная характеристика пикового детектора (а); результаты многократного измерения импульсов с энергией 30 мДж по схеме, изображенной на рис. 2, б. Число импульсов – 10 000, частота следования импульсов – 10 Гц

Значение энергии, полученное с помощью измерителя Coherent и усредненное по 10 000 импульсов, составило $1,744 \pm 0,034$ мДж. Для исследуемого детектора напряжение на выходе пикового детектора составило $2,04 \pm 0,03$ В. Таким образом, можно заключить, что погрешность измерений энергии с помощью исследуемого детектора не превышает погрешности измерений пироэлектрического измерителя.

Была произведена аппроксимация полученных зависимостей с помощью линейной функции ($y = Ax + B$) методом наименьших квадратов. Результаты аппроксимации приведены в табл. 1. В случае исследуемого измерителя наклон аппроксимирующей кривой оказался в три раза меньше, чем для измерителя Coherent.

	A	B
Исследуемый измеритель	$(2,3 \pm 0,7) \times 10^{-6}$	$2,304 \pm 0,004$
Измеритель Coherent	$(6,7 \pm 0,5) \times 10^{-6}$	$1,701 \pm 0,001$

Таблица 1. Результаты аппроксимации результатов измерений для различных детекторов

Зависимость показаний исследуемого детектора от соответствующих показаний измерителя Coherent для первых 500 импульсов представлена на рис. 4. Видно, что зависимость хорошо описывается линейной функцией. Отклонение от линейности может быть связано с различной величиной дрейфа нулевого уровня измерителей. Дискретность значений измеряемого напряжения с выхода пикового детектора связана с низким значением разрядности АЦП.

Для определения рабочего диапазона энергий были проведены исследования влияния длительного воздействия импульсного лазерного излучения на характеристики пленок ИТО. Результаты показали, что при плотностях энергии импульсов, превышающих 78 мДж/см², наблюдается резкое снижение проводимости и необратимое разрушение поверхности. На рис. 5 приведена зависимость отношения сопротивления пластины чувствительного элемента до облучения к сопротивлению того же образца после длительного воздействия импульсного лазерного излучения в зависимости от энергии импульса.

Для каждого значения плотности энергии (точки на оси абсцисс) длительность облучения составила 30 мин при частоте генерации импульсов, равной 10 Гц. Из рис. 5 видно, что при воздействии лазерного излучения с плотностью энергии выше 78 Дж/см² наблюдается увеличение сопротивления образца в некоторых случаях в 10^3 – 10^4 раз (табл. 2). Увеличение сопротивления сопровождалось снижением чувствительности элемента.

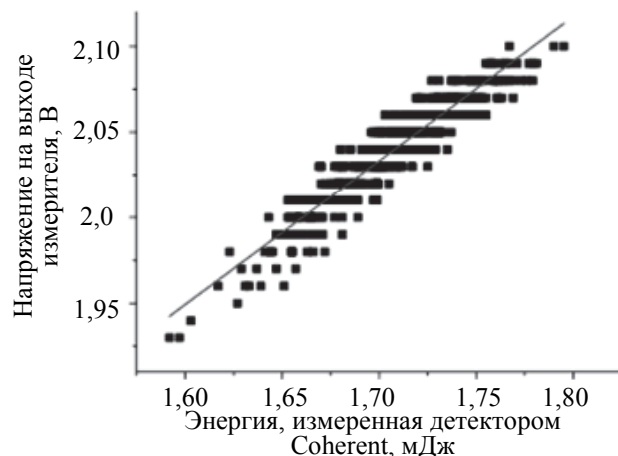


Рис. 4. Корреляционная зависимость между показаниями исследуемого измерителя и измерителя Coherent

Номер образца	Плотность энергии лазерного излучения, мДж/см ²	Сопротивление образца между контактами до облучения R_0 , Ом	Сопротивление образца между контактами после облучения R_1 , Ом
10	115	46	1 000 000
9	104	48	800 000
8	92	54	350 000
7	81	71	75 000
6	69	63	62
5	46	45	43
4	78	70	130

Таблица 2. Сопротивления образцов до и после облучения их лазерным излучением с различной плотностью энергии

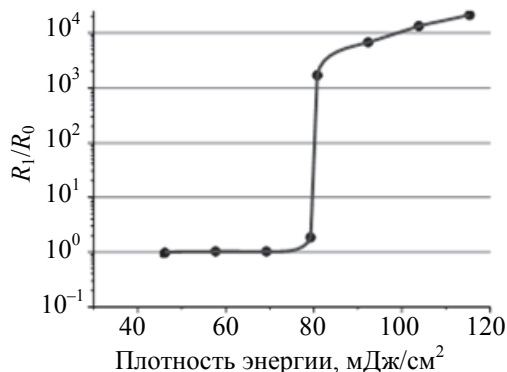


Рис. 5. Зависимость относительного сопротивления (отношение сопротивлений после воздействия облучения к сопротивлению образца до облучения) от энергии импульса

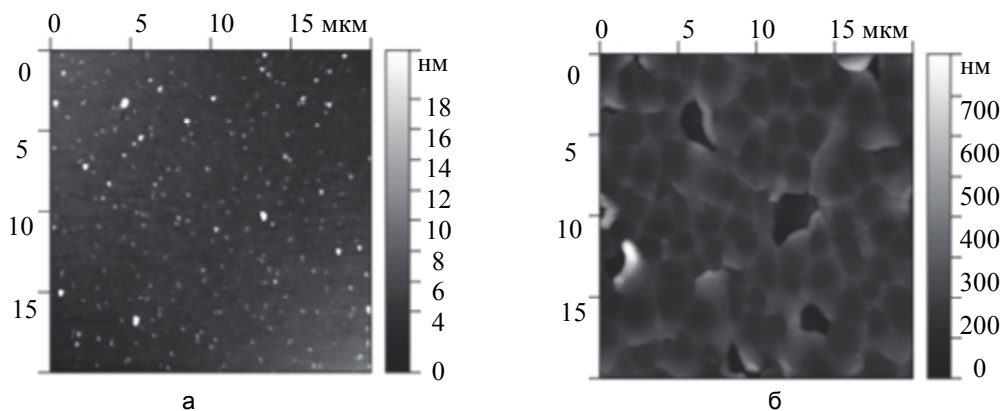


Рис. 1. Топография поверхности пленок ИТО для образцов до облучения лазерным излучением, превышающим критическое значение (а) и после (б)

Топографии поверхности пленок получены с помощью атомно-силового микроскопа. При облучении с плотностью энергии меньше критической изменений топографии не наблюдалось (рис. 6, а). На образцах после облучения с плотностью энергии, превышающей критическое значение, наблюдалось существенное изменение топографии поверхности (рис. 6, б). Видно, что происходит разрушение поверхности вплоть до удаления вещества с поверхности подложки.

Заключение

В настоящей работе предложен метод измерения энергии импульсов эксимерного лазера с помощью фотоэлектрического отклика пленок оксида индия-олова.

Продемонстрировано, что погрешность измерений с помощью измерителя на основе фотоэлектрического отклика не превышает погрешность измерений детектора на основе пироэлектриков. Диапазон плотностей энергии, измеряемых детектором без дополнительных модификаций, составляет от 200 мкДж/см² до 78 мДж/см².

Чувствительный элемент обладает большим быстродействием по сравнению пироэлектрическим детектором [15]. Поскольку пленки оксида индия-олова не обладают пироэлектрическим эффектом, то разрабатываемый измеритель не подвержен влиянию механических воздействий. Температура чувствительного элемента оказывает меньшее воздействие на показания прибора, что позволяет использовать его для непрерывных измерений энергии. Исследуемый измеритель, в отличие от пироэлектрического детектора, не требует калибровки нулевого значения энергии.

Литература

1. Archambault J.L., Reekie L., Russell P.S. Excimer laser production of fiber Bragg gratings // *Proc. SPIE*. 1993. V. 2044. P. 69. doi: 10.1117/12.165676
2. The Digital Display Revolution: Built on Excimer Laser Annealing. Режим доступа: http://www.coherent.co.jp/document/whitepaper/fpd/vyper_laser_annealing.pdf, своб. Яз. англ. (дата обращения 20.02.2017).
3. Sicard E., Boulmer-Leborgne C., Andrezza-Vignolle C., Frainais M. Excimer laser surface treatment of aluminum alloy in nitrogen // *Applied Physics A*. 2001. V. 73. P. 55–60. doi: 10.1007/s003390100742
4. Hourdakis G., Hontzopoulos E.I., Tsetsekou A., Zampetakis Th., Stourmaras C.J. Excimer laser surface treatment of ceramics // *Proc. SPIE*. 1991. V. 1503. P. 249–255. doi: 10.1117/12.46937
5. Waugh D., Lawrence J. The enhancement of biomimetic apatite coatings by means of KrF excimer laser surface treatment of nylon 6,6 biopolymer by means of KrF excimer laser surface treatment // *Lasers in Engineering*. 2011. V. 21. P. 95–114.
6. Bhatt D., Williams K., Hutt D.A., Conway P.P. Process optimisation and characterization of excimer laser drilling of microvias in glass // *Proc. 9th Electronics Packaging Technology Conference*. Singapore, 2007. P. 196–201. doi: 10.1109/EPTC.2007.4469750
7. Optics & Coatings 120 nm - 1064 nm. Режим доступа: <http://www.actonoptics.com/userfiles/files/Acton-Optics-Brochure-revD5-web.pdf>, своб. Яз. англ. (дата обращения 20.02.2017).
8. Eximer Lasers & Optical Systems. Product Catalog. Режим доступа: https://cohrcdn.azureedge.net/assets/pdf/COHR_ExcimerCatalog2016revC.pdf, своб. Яз. англ. (дата обращения 20.02.2017).
9. Measuring Laser Power and Energy Output. Режим доступа: <http://hank.uoregon.edu/experiments/modelocked-fiberlaser/aboutmeasuringlaserpowerndenergyoutputfinal.pdf>, своб. Яз. англ. (дата обращения 20.02.2017).
10. Application Note. Pyroelectric Detectors. Режим доступа: https://gentec-eo.com/Content/downloads/application-note/AN_202194_Photo_or_Pyro.pdf, своб. Яз. англ. (дата обращения 20.02.2017).
11. Odon A. Processing of signal of pyroelectric sensor in laser energy meter // *Measurement Science Review*. 2001. V. 1. N 1. P. 215–218.
12. Whatmore R.W. Piezoelectric and pyroelectric materials and their applications / In: *Electronic Materials*. Eds. L.S. Miller, J.B. Mullen. Springer, 1991. P. 283–290. doi: 10.1007/978-1-4615-3818-9_19

References

1. Archambault J.L., Reekie L., Russell P.S. Excimer laser production of fiber Bragg gratings. *Proc. SPIE*, 1993, vol. 2044, pp. 69. doi: 10.1117/12.165676
2. *The Digital Display Revolution: Built on Excimer Laser Annealing*. Available at: http://www.coherent.co.jp/document/whitepaper/fpd/vyper_laser_annealing.pdf (accessed 20.02.2017).
3. Sicard E., Boulmer-Leborgne C., Andrezza-Vignolle C., Frainais M. Excimer laser surface treatment of aluminum alloy in nitrogen. *Applied Physics A*, 2001, vol. 73, pp. 55–60. doi: 10.1007/s003390100742
4. Hourdakis G., Hontzopoulos E.I., Tsetsekou A., Zampetakis Th., Stourmaras C.J. Excimer laser surface treatment of ceramics. *Proc. SPIE*, 1991, vol. 1503, pp. 249–255. doi: 10.1117/12.46937
5. Waugh D., Lawrence J. The enhancement of biomimetic apatite coatings by means of KrF excimer laser surface treatment of nylon 6,6 biopolymer by means of KrF excimer laser surface treatment. *Lasers in Engineering*, 2011, vol. 21, pp. 95–114.
6. Bhatt D., Williams K., Hutt D.A., Conway P.P. Process optimisation and characterization of excimer laser drilling of microvias in glass. *Proc. 9th Electronics Packaging Technology Conference*. Singapore, 2007, pp. 196–201. doi: 10.1109/EPTC.2007.4469750
7. *Optics & Coatings 120 nm - 1064 nm*. Available at: <http://www.actonoptics.com/userfiles/files/Acton-Optics-Brochure-revD5-web.pdf> (accessed 20.02.2017).
8. Eximer Lasers & Optical Systems. Product Catalog. Available at: https://cohrcdn.azureedge.net/assets/pdf/COHR_ExcimerCatalog2016revC.pdf (accessed 20.02.2017).
9. *Measuring Laser Power and Energy Output*. Available at: <http://hank.uoregon.edu/experiments/modelocked-fiberlaser/aboutmeasuringlaserpowerndenergyoutputfinal.pdf> (accessed 20.02.2017).
10. *Application Note. Pyroelectric Detectors*. Available at: https://gentec-eo.com/Content/downloads/application-note/AN_202194_Photo_or_Pyro.pdf (accessed 20.02.2017).
11. Odon A. Processing of signal of pyroelectric sensor in laser energy meter. *Measurement Science Review*, 2001, vol. 1, no. 1, pp. 215–218.
12. Whatmore R.W. Piezoelectric and pyroelectric materials and their applications. In *Electronic Materials*. Eds. L.S. Miller, J.B. Mullen. Springer, 1991, pp. 283–290. doi: 10.1007/978-1-4615-3818-9_19
13. Odon A. Voltage response of pyroelectric PVDF detector to pulse source of optical radiation. *Measurement Science Review*, 2005, vol. 5, sect. 3, pp. 55–58.

- 4615-3818-9 19
13. Odon A. Voltage response of pyroelectric PVDF detector to pulse source of optical radiation // *Measurement Science Review*. 2005. V. 5, Sect. 3. P. 55–58.
 14. Gondal M.A., Durrani S.M.A., Khawaja E.E., Laser pulse photodetectors based on Sn-dopes indium oxide films // *European Physical Journal Applied Physics*. 1998. V. 8. P. 37–42. doi: 10.1051/epjap:1999227
 15. Мешковский И.К., Плясов С.А. Фотоэлектрический и фотомагнитный отклик пленок оксида индия-олова // *Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики*. 2015. Т. 15. № 6. С. 969–975. doi: 10.17586/2226-1494-2015-15-6-969-975
 16. Sauli Z., Retnasamy V., Keng C.J., Palianysamy M., Kamarudin H. Reflectance analysis of sputtered indium tin oxide(ITO) using UV Lambda // *Applied Mechanics and Materials*. 2014. V. 680. P. 102–105. doi: 10.4028/www.scientific.net/AMM.680.102
 14. Gondal M.A., Durrani S.M.A., Khawaja E.E., Laser pulse photodetectors based on Sn-dopes indium oxide films. *European Physical Journal Applied Physics*, 1998, vol. 8, pp. 37–42. doi: 10.1051/epjap:1999227
 15. Meshkovskiy I.K., Plyastsov S.A. Photoelectric and photomagnetic response of indium-tin oxide films. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2015, vol. 15, no. 6, pp. 969–975. (In Russian) doi: 10.17586/2226-1494-2015-15-6-969-975
 16. Sauli Z., Retnasamy V., Keng C.J., Palianysamy M., Kamarudin H. Reflectance analysis of sputtered indium tin oxide(ITO) using UV Lambda. *Applied Mechanics and Materials*, 2014, vol. 680, pp. 102–105. doi: 10.4028/www.scientific.net/AMM.680.102

Авторы

Мешковский Игорь Касьянович – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, igorkm@niuitmo.ru
Плясов Семен Алексеевич – инженер, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, plyastsov@niuitmo.ru

Authors

Igor K. Meshkovskiy – D.Sc., Professor, Head of Chair, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, igorkm@niuitmo.ru
Semyon A. Plyastsov – engineer, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, plyastsov@niuitmo.ru